

УДК 621.7.9(075)

Ю.В. Петраков, д-р техн. наук, проф.  
НТУУ «КПІ», г. Киев, Украина  
Тел./Факс: +38 (044) 4068106; E-mail: [yp-86@yandex.ru](mailto:yp-86@yandex.ru)

## УСЛОВИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВКИ В СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЯХ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ТИПА ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

*Представлен новый подход к расчету станочных приспособлений, основанный на моделировании процессов, происходящих при резании и характеризующихся изменениями во времени силовых возмущений. Разработана прикладная программа, ядром которой является математическая модель динамической системы приспособления и процесса торцевого фрезерования. Главное, что делает модель более адекватной, является учет обработки «по следу», в результате чего в технологической обрабатывающей системе возникают автоколебания. Прикладная программа может использоваться при проектировании станочных приспособлений и выборе режима резания при торцевом фрезеровании.*

**Ключевые слова:** станочные приспособления, моделирование, управление режимом резания

### 1. Вступление

Обработка большинства деталей выполняется с помощью станочных приспособлений, которые являются звеном технологической обрабатывающей системы (ТОС). Известно, что при расчете приспособлений исходят из условия равновесия заготовки под действием силы резания с одной стороны и силы зажима с другой. При этом используют так называемый коэффициент запаса (коэффициент незнания), который в некоторых случаях достигает значительных величин (3..6) [1,2,3]. Все это обусловлено тем, что все станочные приспособления используются в условиях действия силы резания, которая является квазистационарной, изменяется во время обработки, причем эти изменения могут быть достаточно быстрыми и зависеть от выбранного режима резания. Такие изменения вызывают реакцию всей ТОС в соответствии с ее динамическими характеристиками. Поэтому при расчете силы зажима необходимо учитывать все эти динамические явления, которые имеют место на практике, что позволит правильно рассчитать необходимую силу зажима и режим резания, что обеспечит необходимую производительность обработки при требуемом качестве.

Одной из наиболее нестационарных операций обработки резанием является операция торцевого фрезерования, которая сопровождается существенной неравномерностью силы резания, где правильный расчет приспособления является особенно актуальным.

### 2. Теоретическая часть

Для решения поставленной задачи прежде всего необходимо составить математическую модель процесса фрезерования, который выполняется в упругой системе, ближайшим к процессу резания звеном которой является станочное приспособление – тиски.

При фрезеровании, на каждом режущем зубе фрезы, возникает сила резания, которая может быть разложена на составляющие по выбранной системе координат. На

рис.1 показана фреза радиусом  $R_\phi$ , которая имеет 8 зубцов и обрабатывает заготовку шириной  $B$  при продольной подаче  $S$ . Приблизительно можно считать, что резания осуществляется по дуге  $AC$ , которая, при симметричном фрезеровании, определяется углом  $\varphi_p$ . Таким образом используется несколько упрощенная схема, поскольку реально каждый зуб при непрерывной подаче  $S$ , описывает циклоиду.

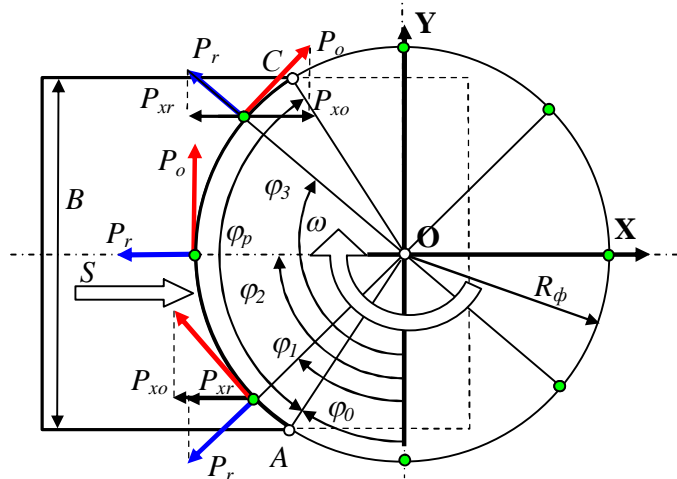


Рис. 1. Схема разложения силы резания в горизонтальной плоскости

В горизонтальной плоскости составляющая силы резания на каждом зубе раскладывается на окружную составляющую  $P_o$  и радиальную  $P_r$ . Окружная составляющая силы резания на одном зубе может быть рассчитана по известной формуле [4]:

$$P_o = C_p (S_z)_\phi^{1-k} (H)_\phi^{1-\mu} \sin^{1-k} \varphi, \quad (1)$$

где  $C_p$ ,  $k$  и  $\mu$  – коэффициент и показатели степени, зависящие от механических свойств обрабатываемого материала,  $(S_z)_\phi$  – фактическая подача на зуб,  $(H)_\phi$  – фактическая глубина резания,  $\varphi$  – угловая координата расположения зуба.

Учитывая, что радиальная составляющая  $P_r \approx 0,6P_o$ , составляющая силы резания, действующая в направлении оси X:

$$P_x = P_{xr} + P_{xo} = P_o (\cos \varphi + 0,6 \sin \varphi). \quad (2)$$

В зависимости от соотношения диаметра фрезы, количества зубьев и ширины фрезерования в резании может принимать участие несколько зубьев одновременно, причем количество зубьев фрезы, которые находятся в работе постоянно изменяется от максимального  $n_{\max} = 1 + \varphi_p z / 2\pi$  до минимального  $n_{\min} = \varphi_p z / 2\pi$ . Таким образом, при определении действующей силы резания по формулам (1) и (2) следует учитывать эту особенность процесса фрезерования.

В первом приближении, с учетом процесса резания, который выполняется в замкнутой упругой системе, в направлении координаты X, он может быть представлен функциональной схемой рис.2.

На функциональной схеме процесс резания представлен блоком, на входе которого действует фактическая подача на зуб  $(S_z)_\phi$ , а на выходе – горизонтальная составляющая  $P_x$  силы резания по оси X. Составляющая  $P_x$  действует на эквивалентную упругую систему (ЭУС) и вызывает ее деформацию  $\delta S_z$ , которая, вследствие

замкнутости ТОС [5], провоцирует изменение фактической подачи на зуб фрезы:  $(S_z)_\phi = (S_z)_1 - \delta S_z$ .

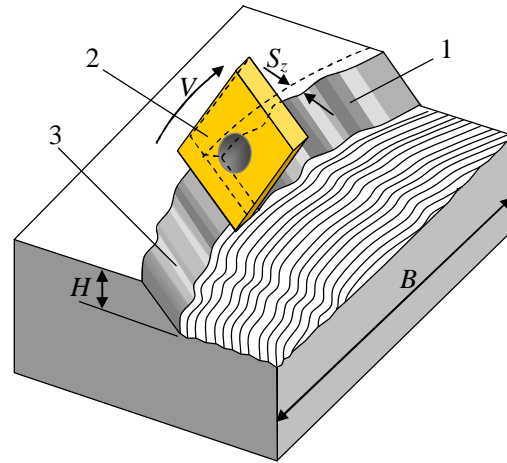
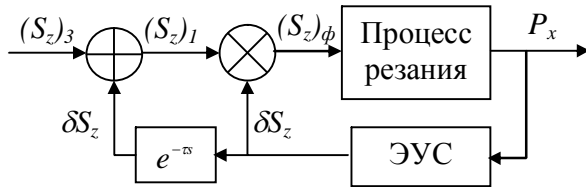


Рис. 2. Функциональная схема процесса резания

Рис. 3. Обработка «по следу»

Кроме того необходимо учитывать обработку «по следу», а именно, когда каждый следующий зуб фрезы срезает слой припуска, который искажается предыдущим зубом вследствие колебаний динамической системы. На рис.3 поясняется эффект обработки «по следу», где последствия колебаний системы показаны в увеличенном масштабе: поверхность 1 заготовки, которая образована предыдущим зубом фрезы обрабатывается следующим зубом 2, который, в свою очередь формирует поверхность 3, которая будет обрабатываться другим следующим зубом и т.д. Такой феномен представлен на функциональной схеме с помощью запаздывающего звена с передаточной функцией  $e^{-ts}$ , где  $\tau$  - час прохождения угла между двумя соседними зубьями,  $s$  – оператор Лапласа.

Таким образом, фактическая подача на зуб:

$$(S_z)_\phi = (S_z)_3 - \delta S_z (1 - e^{-t\tau}), \quad (3)$$

где  $(S_z)_3$  – заданная подача на зуб фрезы.

Ограничиваясь заготовкой и зажимным приспособлением эквивалентная упругая система может быть представлена двумя моделями: при использовании зажимного приспособления первого типа – по схеме рис.4, а, при использовании зажимного приспособления второго типа – по схеме рис.4, б. Для обеих схем заготовка 1 зажата между подвижной 2 и неподвижной 3 губками зажимного приспособления и обрабатывается фрезой 4, которая создает возмущение в виде составляющей  $P_x$  силы резания.

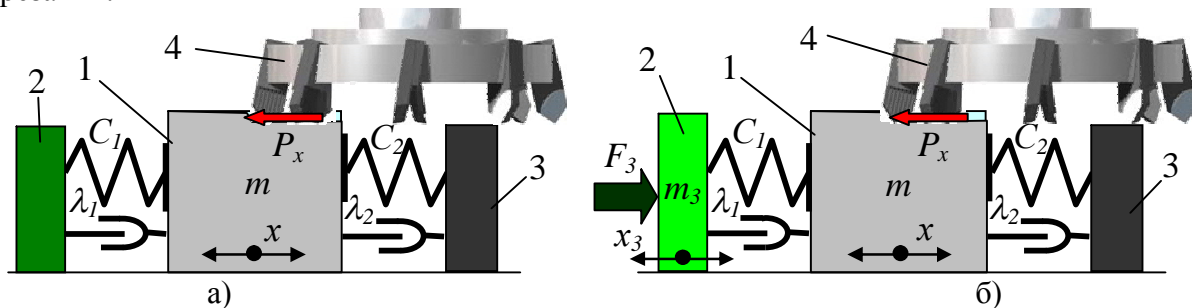


Рис. 4. Модели динамических систем

Математическая модель движения системы по рис.4, а, представляющая зажимное приспособление первого типа, является нелинейной и может быть представлена в виде дифференциального уравнения:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + Cx = P_x, \quad (4)$$

где  $m$  – масса заготовки,  $P_x$  – составляющая силы резания,  $C=C_1+C_2$  – жесткость связи,  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$  – вязкое трение. При раскрытии левого стыка:  $C=C_2$ ,  $\lambda = \lambda_2$ , при раскрытии правого стыка:  $C=C_1$ ,  $\lambda = \lambda_1$ .

Математическая модель движения системы по рис.4, б, которая представляет зажимное приспособление второго типа, например с зажимным пневмоцилиндром, может быть записана в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda_2 \frac{dx}{dt} + C_2 x + \lambda_1 \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + C_1 (x - x_3) = P_x \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + \lambda_1 \left( \frac{dx_3}{dt} - \frac{dx}{dt} \right) + C_1 (x_3 - x) = -F_3 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $m_3$  – масса зажимной губки,  $F_3$  – сила зажима от пневмоцилиндра.

Разработанная математическая модель учитывающая динамические явления, происходящие в упругой ТОС, которая упрощенно представлена заготовкой и зажимным приспособлением, позволяет исследовать процесс торцевого фрезерования в направлении одной координаты (в направлении продольной подачи) и определять максимально допустимый режим резания по критерию потери устойчивости.

### 3. Моделирование

Составленная математическая модель использована в программе, предназначенной для моделирования динамических процессов, происходящих в зажимных станочных приспособлениях первого и второго типов при торцевом фрезеровании.

Для работы с программой сначала необходимо выбрать тип зажимного, задать исходные данные и выполнить зажим заготовки – в графическом окне происходит анимация зажима. Для фрезерования в направлении подвижной губки подача задается позитивной, а для фрезерования в направлении неподвижной губки – негативной.

После окончания зажима для моделирования нажать «Процесс» - выполняется анимация фрезерования с появлением характеристик на экране виртуального осциллографа. Можно выбирать осциллограммы - "Сила и деформация во времени" или "Толщина резания по дуге резания".

Целью исследований является определение зависимости максимально допустимой глубины резания от заданных параметров ТОС. При этом предусмотрена возможность исследования ТОС с зажимными приспособлениями первого и второго типов с направлением подачи фрезерования на подвижную и неподвижную губки. Максимально допустимая глубина резания определяется по амплитуде деформации ТОС, которая вызывает раскрытие стыка, левого или правого, или обоих по очереди. Такое событие сопровождается появлением в графическом поле анимации соответствующей надписи.

Например, на рис.5 показано состояние интерфейса программы при моделировании процесса фрезерования (после достижения установившегося режима) с зажимным приспособлением первого типа и подачей в направлении на подвижную губку.

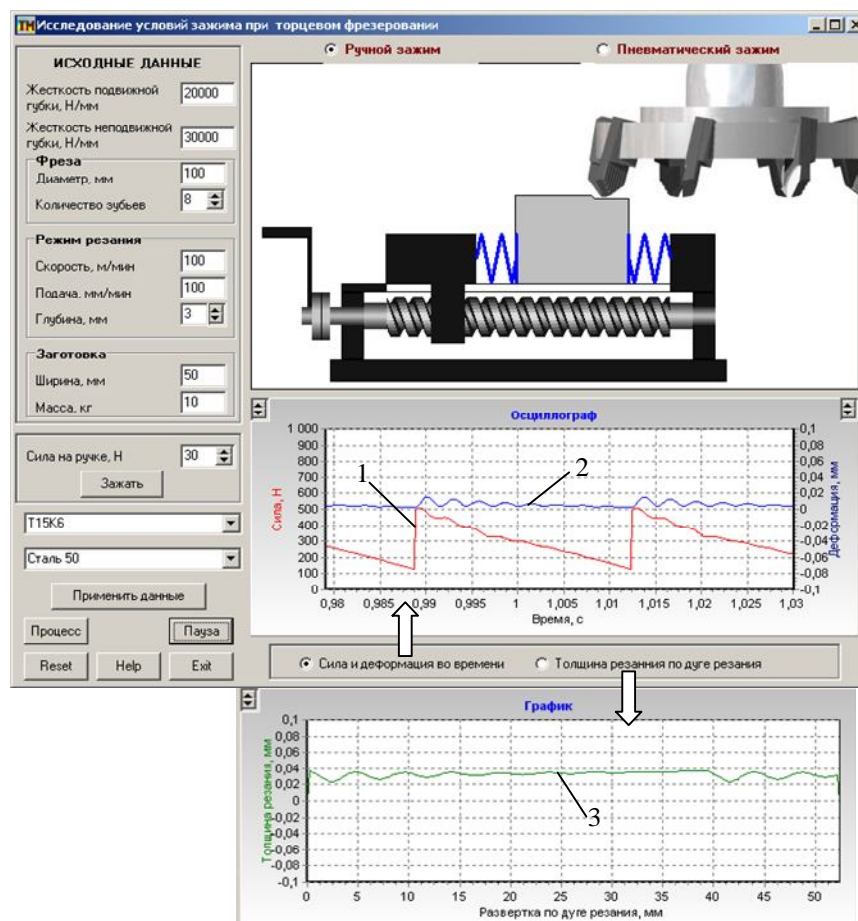


Рис. 5. Интерфейс программы при моделировании фрезерования с глубиной резания 3мм

В это время фрезерования происходит по всей ширине (50мм) обрабатываемой заготовки. В поле осциллографа показано: линия 1 – изменение составляющей  $P_x$  силы резания в направлении подачи (смотри (2)), линия 2 – деформация упругой системы. При выборе опции «Толщина резания по дуге резания» появляется осциллограмма изменения фактической толщины резания – линия 3.

Поскольку для принятых исходных данных резание по всей ширине осуществляется одним или двумя зубцами фрезы, то составляющая  $P_x$  силы резания изменяется от 150Н до 500Н, что вызывает соответствующую реакцию упругой ТОС и провоцирует возникновение колебаний как силы резания, так и упругой деформации. Максимальная амплитуда колебаний, измеренная по осциллограмме, составляет 0,014мм.

Расчетное значение подачи на зуб фрезы может быть определено по известной формуле:

$$S_z = \frac{S\pi D_\phi}{1000Vz}, \quad (6)$$

где  $S$  – подача (мм/мин),  $D_\phi$  – диаметр фрезы (мм),  $V$  – скорость резания (м/мин),  $z$  – количество зубьев.

Для условий эксперимента имеем  $S_z=0,039$ мм, однако, из графика изменения толщины резания (линия 3 на рис.5) эта величина изменяется от 0,039мм до 0,025мм,

причем характер изменений колебательный, полностью соответствует колебаниям упругой ТОС – линия 2 на рис.5. На графике изменения толщины резания по дуге резания можно выделить два участка, где резание осуществляется двумя зубьями фрезы.

Результаты моделирования при различных глубинах резания для фрез с различным количеством зубьев представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов

№	Глубина резания, мм	Амплитуда колебаний, мм		
		Z=8	Z=12	Z=16
1	1	0,006	0,004	0,003
2	1,5	0,007	0,006	0,005
3	2	0,009	0,008	0,054
4	2,5	0,011	0,083	0,091
5	3	0,014	0,115	0,144
6	3,5	0,02	0,148	0,23
7	4	0,121	0,193	р.п.с.
8	4,5	0,16	0,229	
9	5	0,195	р.п.с.	
10	5,5	0,224		
11	6	0,268		
12	6,5	р.п.с.		

Примечание: р.п.с. – раскрытие правого стыка.

При увеличении глубины резания амплитуда колебаний ТОС увеличивается и характер резания существенно изменяется. На рис.6 представлена осциллограмма изменения толщины резания при установившемся процессе для заданной глубины резания 4,5мм. Амплитуда упругих деформаций увеличивается до 0,16мм, что значительно превышает расчетную подачу на зуб фрезы, причем часть траектории находится в негативной области. Такой характер колебаний вызывает изменение характера толщины резания на части траектории, которая соответствует негативным значениям деформации, резание не происходит, а максимальная толщина резания достигает 0,12мм. Очевидно, что при такой глубине резания процесс не может быть реализован на практике, хотя стыки между заготовкой и губками тисков не раскрываются и заготовка остается зажатой.

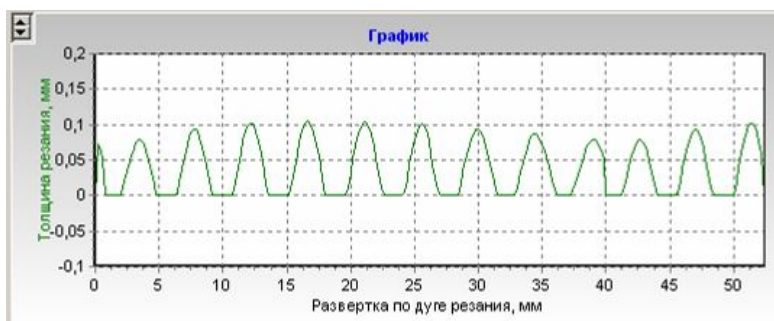


Рис. 6. Изменение толщины резания при заданной глубине фрезерования 4,5мм

При увеличении глубины резания до 6,5мм наступает раскрытие правого стька в определенные моменты времени (рис.7). Моделирование заканчивается и определяется максимально допустимая глубина резания 6мм (смотри таблицу 1).

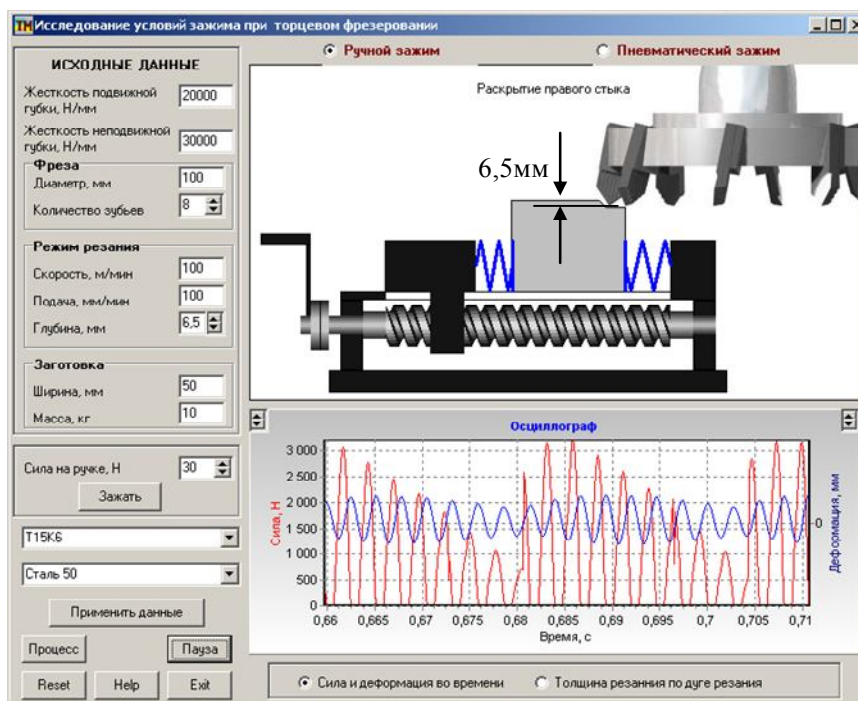


Рис. 7. Интерфейс программы при раскрытии правого стька

Следующие эксперименты проведены с целью определения влияния на процесс фрезерования количества зубьев фрезы, поскольку с этим параметром связана частота действия возмущения в виде изменения силы резания. Увеличение количества зубьев фрезы без изменения скорости резания приводит к увеличению частота изменения возмущающего воздействия на упругую ТОС, приближая ее к частоте собственных колебаний. Эксперименты проводятся аналогичным образом, а результаты в графическом виде представлены на рис.8.

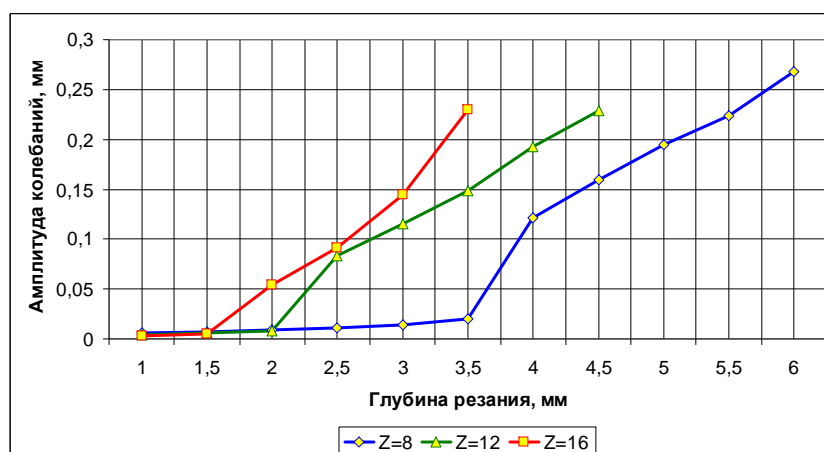


Рис. 8. Графики зависимости амплитуды колебаний от глубины резания

Прикладная программа позволяет провести эксперименты и для тисков с пневматическим зажимом заготовки. Поскольку такое приспособление относится к зажимным приспособлениям второго типа, где в цепи передачи усилия отсутствует самотормозящая кинематическая пара, то характер процесса фрезерования существенно изменяется при тех же исходных данных ТОС и процесса резания. Хотя колебания в системе все же таки возникают приблизительно с той же амплитудой, их частота изменяется, что поясняется демпфирующими свойствами зажимного приспособления и наличием двухмассовой системы, где, при определенном соотношении параметров обеих масс, может происходить автоматическое гашение колебаний [У].

При увеличении глубины резания характер колебаний изменяется, приближаясь к тому, который был зафиксирован при исследовании тисков первого типа, т.е. с ручным зажимом.

При количестве зубьев фрезы  $z=8$  на всем диапазоне изменения глубины резания, который допускается программой - до 10мм включительно, не было выявлено раскрытия стыков. Для фрез с количеством зубьев 12 и 16 при глубине резания 9мм и 7мм соответственно происходило раскрытие правого стыка (рис.9).

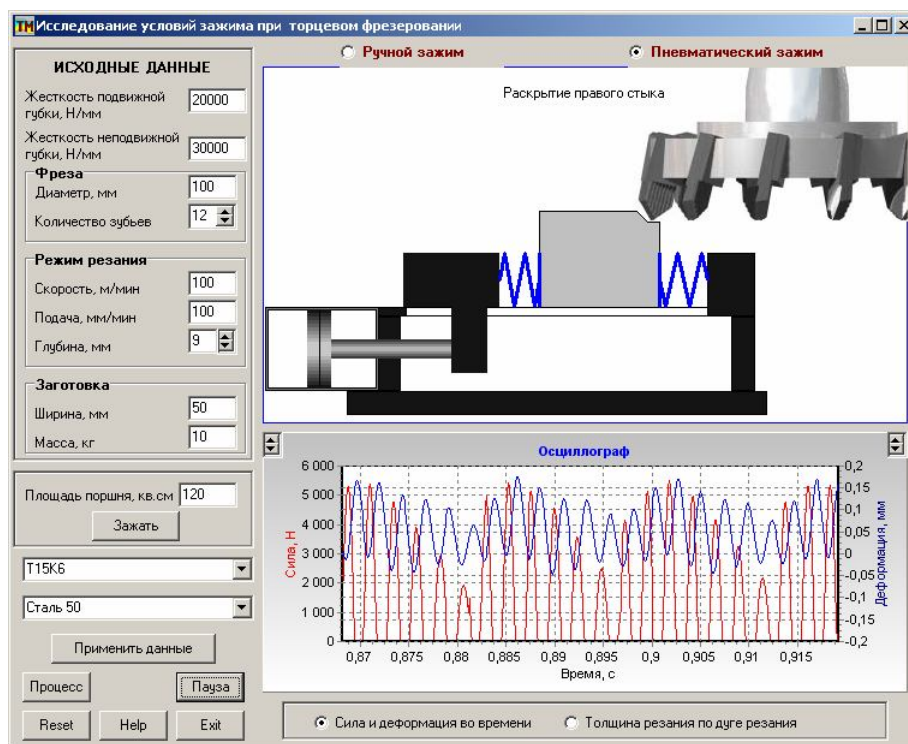


Рис. 9. Интерфейс программы при моделировании фрезерования с глубиной резания 9мм для фрезы  $z=12$

Проведение экспериментов для тисков с пневматическим зажимом, т.е. зажимных приспособлений второго типа, при направлении подачи на неподвижную губку показало такие же результаты, что и при направлении подачи на подвижную губку – экспериментальные данные представлены в табл.2.

Для тисков с пневматическим зажимом на всем диапазоне изменения глубины резания и количества зубьев фрезы не было зафиксировано раскрытие левого стыка.



Такое поведение ТОС также объясняется отсутствием самотормозящей кинематической пары в цепи передачи усилия зажима и упругой связью со второй массой (смотри модель (5)).

Таблица 2. Результаты экспериментов

№	Глубина резания, мм	Амплитуда колебаний, мм		
		Z=8	Z=12	Z=16
1	1	0,006	0,005	0,002
2	2	0,012	0,01	0,005
3	3	0,017	0,015	0,007
4	4	0,026	0,021	0,061
5	5	0,03	0,06	0,1
6	6	0,035	0,089	0,158
7	7	0,041	0,117	р.п.с.
8	8	0,051	0,16	
9	9	0,132	р.п.с.	
10	10	0,169		

Примечание: р.п.с. – раскрытие правого стыка.

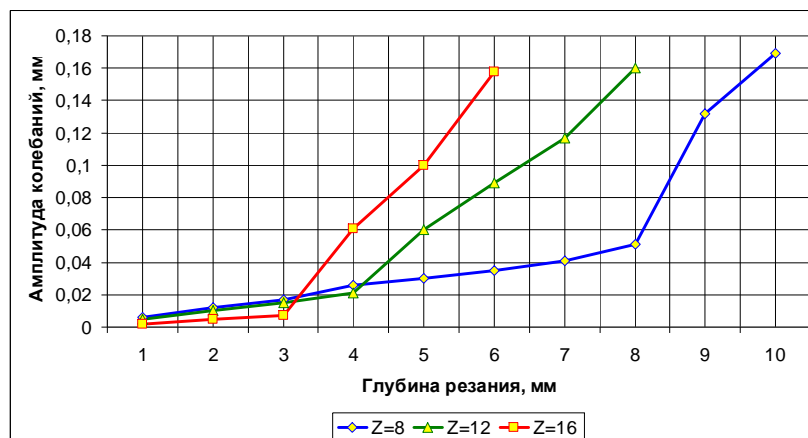


Рис. 10. Графики зависимости амплитуды колебаний от глубины резания для тисков с пневматическим зажимом

### Выводы

1. Сила резания (ее составляющая  $P_x$ ) при учете упругой ТОС, которая представлена зажимным приспособлением, существенно зависит от колебаний ТОС и в общем случае не может рассчитываться по известным из теории резания зависимостям, поскольку последние не учитывают динамику процесса, всегда сопровождающую процесс фрезерования. Например, при глубине резания 3мм (когда колебания упругой ТОС незначительны) максимальная величина составляющей  $P_x$  силы резания по зависимостям (1) и (2) составляет 500Н, такая же максимальная величина этой составляющей и на осциллограмме при моделировании (смотри рис.5). При увеличении глубины резания до 4,5мм составляющая силы резания по приведенным выше зависимостям 750Н, тогда как по осциллограмм при моделировании она составляет 1650Н, т.е. почти в 2,2 раза больше.

2. Для зажимных приспособлений первого типа максимально допустимая глубина резания (фрезерование без раскрытия стыков) больше при направлении подачи

на неподвижную губку, хотя при использовании критерия отсутствия колебаний, амплитуда которых превышает подачу на зуб фрезы, глубина резания одинакова и существенно зависит только от количества зубьев фрезы (смотри рис.8).

3. Разработанная методика и прикладная программа рекомендуется к использованию в курсе «Проектирование станочных приспособлений» при подготовке специалистов и магистров по технологии машиностроения.

#### **Список литературы:**

1. Шишкин В.П., Закураев В.В. Основы проектирования станочных приспособлений / под ред. А.Е. Беляева. - М.: НИЯУ МИФИ, 2010.-288с.
2. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений. - М.: Машиностроение, 1983.-277с.
3. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х Т. / Ред. совет: Б.Н. Вардашкин и др. – М.: Машиностроение, 1984. – Т.1 592с., Т.2 656с.
4. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Моделирование процессов резания. Рекомендовано УМО Российской Федерации для студентов направления 150400 – «Технологические машины и оборудование». Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 240с.
5. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания. Рекомендовано УМО Российской Федерации для студентов направления 220100. Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 408с.

Надійшла до редакції 21.05.2014

#### **TERMS OF FIXING OF WORKPIECE IN MACHINE-TOOL DEVICE OF THE FIRST AND SECOND TYPE AT THE BUTT-END MILLING**

**Petrakov Y.V.**

*The new going is presented near the calculation of machine-tool devices, based on the simulation of processes, what be going on at cutting and characterized time-histories power indignations. The application program the kernel of which is a mathematical model of the dynamic system of device and process of the butt-end milling is developed. Mainly, that does a model more adequate, there is an account of machining «on track», as a result there are autovibration in the technological processing system. The application program can be used for design of machine-tool devices and choice of the cutting mode at the butt-end milling.*

**Keywords:** machine-tool device, simulation, control of the cutting mode.

#### **УМОВИ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ У ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ**

**Петраков Ю.В.**

*Представлений новий підхід до розрахунку верстатних пристроїв, заснований на моделюванні процесів, що відбуваються при різанні і характеризуються змінами в часі силових обурень. Розроблена прикладна програма, ядром якої є математична модель динамічної системи пристрою і процесу торцевого фрезерування. Головне, що робить модель адекватнішою, є урахування обробки «по сліду», внаслідок чого в технологічній оброблювальній системі виникають автоколивання. Прикладна програма може використовуватися при проектуванні верстатних пристосувань і виборі режиму різання при торцевому фрезеруванні.*

**Ключові слова:** верстатні пристосування, моделювання, управління режимом різання.